

УДК 621.923

Л.П. Калафатова, д-р техн. наук, П.Г. Матюха, д-р техн. наук,  
Покровськ, Україна

## **ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ РІЗНОЇ ПРИРОДИ, ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І СТРУКТУРИ**

*Визначені шляхи підвищення ефективності шліфування важкооброблюваних крихких матеріалів різної природи з урахуванням їх фізико-механічних властивостей і структури. Для конкретних матеріалів встановлені пріоритетні технологічні способи позитивного впливу на процес різання. Розроблена методика визначення оптимальних режимів шліфування твердих сплавів в умовах нестационарності процесу за рахунок повного використання різальних характеристик алмазного інструменту. Встановлено, що дефектність сформованої поверхні при обробці технічних сплавів і кераміки залежить від рівня напружено-деформованого стану зони обробки, на які впливають вхідні параметри процесу шліфування.*

*Ключові слова:* ефективність шліфування, алмазний інструмент, зона обробки

*Определены пути повышения эффективности шлифования труднообрабатываемых хрупких материалов различной природы с учетом их физико-механических свойств и структуры. Для конкретных материалов установлены приоритетные технологические способы положительного влияния на процесс резания. Разработана методика определения оптимальных режимов шлифования твердых сплавов в условиях нестационарности процесса за счет полного использования режущих характеристик алмазного инструмента. Установлено, что дефектность формируемой поверхности при обработке технических сплавов и керамики зависит от уровня напряженно-деформированного состояния зоны обработки, на который влияют входные параметры процесса шлифования.*

*Ключевые слова:* эффективность шлифования, алмазный инструмент, зона обработки

*The ways of increasing the efficiency of grinding hard-to-work brittle materials of various nature taking into account their physic-mechanical properties and structure are determined. Priority technological methods of positive influence on the cutting process are established for specific materials. The method for determining the optimal modes of grinding hard alloys under conditions of nonstationarity of the process is developed due to the full use of the cutting properties of a diamond tool. It is established that the defectness of the surface formed during processing of technical ceramics and cetalals depends on the level of the stress-strain state of the treatment zone, which is influenced by the input parameters of the grinding process.*

*Keywords:* efficiency of grinding, diamond tool, treatment zone

### **Вступ**

Сьогодні сучасні галузі промисловості, такі як аерокосмічна, оборонна, ядерна, хімічна, металургійна, інструментальна широко використовують крихкі матеріали (металевої природи - тверді сплави і мінеральної природи - технічні кераміки, в тому числі ситали), властивості яких дозволяють забезпечити необхідні експлуатаційні характеристики виробів для вказаних галузей. Маючи підвищені міцність, зносостійкість, теплостійкість, а матеріали мінеральної природи і корозійну стійкість та радіопрозорість, за

показниками оброблюваності різанням вони відносяться до важкооброблюваних і передбачають у технологічних процесах механічної обробки обов'язкові операції шліфування алмазними інструментами для забезпечення потрібної якості сформованої поверхні. Процес шліфування супроводжується виникненням приповерхневого дефектного шару, який негативно впливає на експлуатаційні характеристики виробів і має бути видалений різними способами, а у крихких неметалевих матеріалах - з подальшим модифікуванням і зміцненням отриманих поверхонь. Глибина і структура дефектного шару впливають на трудомісткість його видалення, а отже і на собівартість продукції, що випускається, і залежать від фізико-механічних характеристик цих матеріалів і умов шліфування.

Рішення завдання, пов'язаного із забезпеченням підвищення ефективності механічної обробки крихких важкооброблюваних конструкційних матеріалів присвячені багато наукових праць і практичних розробок. Так підвищення продуктивності шліфування твердих сплавів досягається за рахунок: використання шліфувальних кругів із надтвердих матеріалів (переважно на металевій зв'язці) з оптимальними характеристиками [2]; додаткових електро-фізико-хімічних дій на робочу поверхню круга [3 - 5]; оптимізації режимів шліфування [3 - 10]. При цьому для пошуку оптимальних режимів шліфування використовуються як дослідно-статистичні моделі [3 - 4, 8], так і експериментально-аналітичні шляхи [5 - 7, 9 - 10], коли знаходження оптимальних режимів здійснюється з використанням нового поняття «поточна лімітована різальна здатність круга», яка характеризує зміну різальної здатності круга під час шліфування.

При виробництві деталей із крихких неметалевих матеріалів (КНМ), особливо конструкцій типу тонкостінних оболонок складної просторової форми (обтічники ракет, корпуси приборів, тощо) першорядним фактором, що впливає на технологію виробництва, є необхідність забезпечення відсутності дефектного шару на обробленій поверхні, наявність якого негативно відбивається на експлуатаційних характеристиках виробів [11 - 14]. Тому продуктивність шліфування КНМ у значній мірі визначається трудомісткістю видалення дефектного шару.

Таким чином, **метою роботи** є визначення шляхів підвищення ефективності шліфування (продуктивності, якості і точності обробки) твердих сплавів і технічної кераміки з урахуванням особливостей їх фізико-механічних характеристик і структури.

### **Основний зміст роботи**

Перед тим, як визначати шляхи підвищення ефективності шліфування твердих сплавів і технічної кераміки розглянемо таблицю, в якій в узагальненому виді представлені деякі фізико-механічні властивості найширше вживаних видів твердих сплавів, ситалу і кераміки [11 - 12, 15], які значною мірою визначають їх оброблюваність і особливості шляхів підвищення продуктивності процесів шліфування.

Таблиця – Фізико-механічні властивості крихких конструкційних матеріалів

| Параметри   | Види оброблюваних матеріалів |                 |                 |                                       |
|---|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------|
|   | Тверді сплави груп:          |                 | Ситал<br>AC 418 | Кварцова<br>кераміка SiO <sub>2</sub> |
|   | ВК3-ВК25                     | T30K4<br>T15K12 |                 |                                       |
| Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> • 10 <sup>3</sup>  | 12,9 - 15,4                  | 6,5 – 13,5      | 2,5 – 2,6       | 2,0 – 2,2                             |
| Модуль пружності $E$ , ГПа  | 480 - 660                    | 430 - 560       | 90              | 50 - 60                               |
| Межа міцності, МПа<br>при: згинанні $\sigma_z$<br>розтягуванні $\sigma_p$<br>стисненні $\sigma_c$ |                              |                 | 100 145         | 35 - 85                               |
|   | 590 - 1450                   | 950 - 1650      | 60 - 64         | 35                                    |
|   | 3030 - 4910                  | 3000 - 4300     | 1500            | 304                                   |
| Твердість $HV$ , ГПа  | 9,0 – 16,0                   | 11,5 – 22,0     | 7,8             | 3,2                                   |
| Теплостійкість, °C  | 950 - 1100                   | 800 - 1000      | 1320            | 2200                                  |
| Коефіцієнт термічного<br>лінійного розширення<br>(КТЛР) 10 <sup>6</sup> , град <sup>-1</sup>      | 4,1 – 6,0                    | 5,5 – 6,6       | 0,5 – 2,2       | 0,5 – 0,7                             |
| Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>  | 1,5 – 5,1                    | 0,7 – 0,9       | до 5            | 1,2                                   |
| Критерій крихкості<br>$\chi = \sigma_p / \sigma_c$  | 0,16 – 0,3                   | 0,3 – 0,38      | 0,04            | 0,115                                 |

Порівнюючи фізико-механічні властивості твердих сплавів і КНМ на прикладі ситалу AC 418 і кварцової кераміки, можна зробити наступні висновки. Крихкі неметалеві матеріали, які розглядаються, близькі до ідеально крихких. Про це свідчать значення критерію крихкості  $\chi$ . Для керамік цей коефіцієнт дорівнює 0,04...0,14, для твердих сплавів - 0,16...0,58. Керамічні матеріали при абразивній обробці (окрім фінішних абразивних операцій – доведення або притирання) практично пластично не деформуються, вони мають малу щільність (легше за твердих сплавів до 6 разів), високу твердість і зносостійкість, а також теплостійкість, яка перевищує аналогічний показник для твердих сплавів. Висока твердість і температура плавлення керамічних матеріалів обумовлені великою енергією зв'язку між атомами. Це ковалентні або іонні з'єднання. Сильний міжатомний зв'язок визначає високий опір деформації, що позначається на особливостях протікання процесу різання. Незважаючи на низьку міцність при вигині і розтягуванні (до 30 разів менше, ніж у твердих сплавах), ударна в'язкість КНМ співвідносна або дещо перевищує відповідні значення для твердих сплавів. Головним недоліком КНМ, який затрудняє їх абразивну обробку, являється поєднання високої твердості і крихкості, що негативно позначається на якості обробленої поверхні, передусім пов'язаної з утворенням порушеного обробкою поверхневого дефектного шару, глибина проникнення якого (до 1 мм) і структура визначаються умовами шліфування. Цього не спостерігається при обробці твердих сплавів,

при чистовому шліфуванні яких глибина дефектного шару знаходиться в межах 0,1 – 0,18 мм [16].

Окрім зазначеного, до особливостей процесу різання, пов'язаних зі структурою твердих сплавів, відноситься наступне:

- при шліфуванні із швидкістю різання менше 35 м/с переважає крихке руйнування зрізом зерен карбідів, що входять до складу сплаву; при швидкості різання 35 м/с руйнування зрізом проявляється менш чітко, що говорить про наявність пластичної течії [4, 17], як наслідок, при аналітичних розрахунках параметрів шорсткості обробленої поверхні можна допустити, що поперечна форма зрізу визначається формою різальної частини зерна з урахуванням спотворень, викликаних крихким руйнуванням;

- неоднорідність твердого сплаву в зв'язку з тим, що товщина і ширина одиничних зрізів при шліфуванні співрозмірна з розмірами зерен карбідних компонент[1];

- зі збільшенням мікротвердості твердих сплавів їх межа міцності зменшується [17], в зв'язку з чим складові сили різання аналітично можна знайти лише опосередковано.

Відомо, що у значній мірі ефективність технологічних процесів (ТП) механічної обробки визначає спосіб отримання заготовки, коли формується величина припуску, який повинен бути видалений на операціях механічної обробки. Його величина залежить від форми виробу, структури, фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей компонентів матеріалу, якості обробленої поверхні і т. п. Заготовки виробів із твердих сплавів отримуються способами порошкової металургії [17] пресуванням в спеціальних пресформах, які дозволяють забезпечити їх досить високу точність по відношенню до оброблюваної деталі. Так максимальна величина припуску на попереднє шліфування алмазними кругами твердосплавних деталей штампів коливається в діапазоні 0,3 – 0,5 мм [16] і, в залежності від вимог щодо якості оброблюваної поверхні, відповідним чином визначає глибину шліфування і кількість проходів, необхідних для його видалення. Враховуючи незначну величину припуску при шліфуванні виробів із твердих сплавів пошук шляхів підвищення ефективності шліфування потрібно вести в області удосконалення методики знаходження режимів обробки.

Головні антенні обтічники ракет у більшості випадків мають великі габарити, складний геометричний профіль, що унеможливило виготовлення заготовок із ситалів і кварцової кераміки з постійним мінімальним припуском на обробку вздовж формоутворюючих поверхонь виробу. Існуюча технологія отримання заготовок габаритних порожнистих виробів – відцентрове формування не забезпечує їх достатньої точності, особливо при формуванні стінки виробу. При цьому виникають значні відхилення геометричних розмірів заготовки від розмірів готового виробу, нерівномірності товщини стінки в радіальному і поздовжньому напрямках (до 14 мм уздовж твірної виробу), наявність еліпсності у поперечному перерізі [19]. Як наслідок, виникає нерівномірність припуску на механічну обробку по внутрішньому контуру по відношенню до готового виробу. Тому

технологічний процес механічної обробки таких виробів з метою видалення припуску передбачає реалізацію операцій чорнового, напівчистового, чистового шліфування і заключних фінішних операцій алмазного доведення або притирання. При цьому глибина різання на чорнових операціях досягає 2 мм, що характерно для глибинного шліфування.

Виходячи з наведеного, основним шляхом підвищення ефективності шліфування є прогнозування рівня напружено-деформованого стану (НДС) зони різання на основі визначення впливу основних характеристик процесу різання на силовий аспект процесу формоутворення, який забезпечує конкретний напружено-деформований стан зони контакту інструмента і виробу.

Враховуючи особливості фізико-механічних властивостей, різання та структури твердих сплавів, точність отримання заготовки, аналіз переваг та недоліків різних способів пошуку режимів шліфування [2-10], одним із перспективних способів підвищення продуктивності шліфування при забезпеченні якості обробки є визначення режимів шліфування експериментально-аналітичним шляхом, коли знаходження оптимальних режимів виконується з урахуванням різальної здатності круга під час шліфування [19]. В цьому випадку при вирішенні задачі оптимізації режимів найбільш трудомістка частина робіт, які пов'язані з пошуком технічних обмежень, реалізується розрахунками на ПЕОМ, а закон зміни поточної лімітованої різальної здатності круга (ПЛРЗК) під час обробки з електроерозійними діями на робочу поверхню круга знаходиться експериментально з використанням схеми шліфування з постійною силою притискання оброблюваного зразка до РПК (рис. 1).

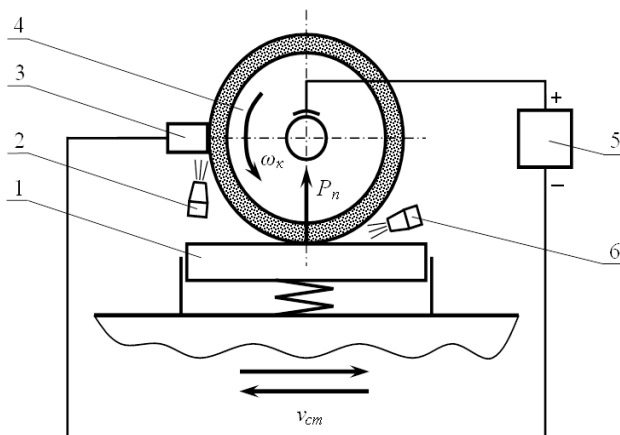


Рисунок 1 – Схема плоского урізного шліфування за пружною схемою з постійною силою притискання  $P_n$  оброблюваного зразка до робочій поверхні круга

Враховуючи те, що в промисловості шліфувальні верстати працюють з режимами, які встановлюються механізмами верстата (жорстка схема) (рис. 2), величину вертикальної подачі роблять перемінною згідно зміни ПЛРЗК, використовуючи в повній мірі різальну здатність РПК. На рис. 1, 2 прийняті наступні позначення: 1 – оброблюваний зразок; 2 – сопло для подачі робочого середовища в міжелектродний проміжок; 3 – автономний електрод-інструмент; 4 – шліфувальний круг; 5 – джерело технологічного струму; 6 – сопло для подачі робочого середовища в зону різання.

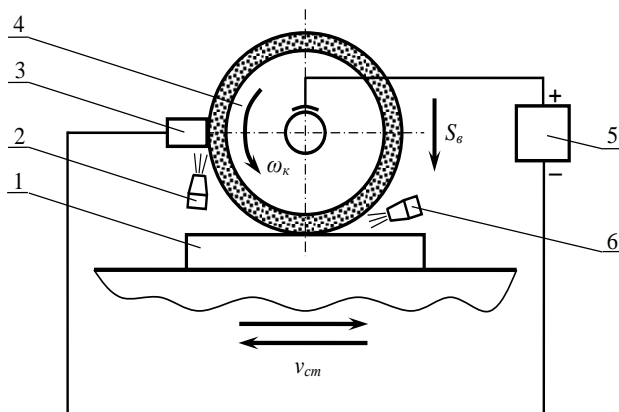


Рисунок 2 – Схема плоского урізного шліфування за жорсткою схемою

Розглянемо, як приклад, послідовність пошуку оптимальних режимів шліфування за «жорсткою» схемою без електроерозійних керуючих дій на РПК кругами, заправленими електроерозійним способом [19]. Вона включає наступні етапи.

1. Розраховується швидкість зразка з твердого сплаву, яка задовольняє технічному обмеженню, що накладається на режим різання необхідною шорсткістю обробленої поверхні.

2. Розраховуються значення зусиль притискання зразка до РПК, що задовольняють технічним обмеженням, які накладаються на зусилля притискання  $P_n$  температурою фазово-структурних перетворень у поверхневому шарі заготовки, міцністю алмазних зерен і температурою окислення алмазів.

3. Визначається лімітоване зусилля притискання заготовки до круга, при якому задовольняються усі знайдені в пункті 2 технічні обмеження.

4. За допомогою експерименту, використовуючи схему шліфування з постійним зусиллям підтиску заготовки до РПК (див рис. 1), кінематика якої аналогічна шліфуванню за «жорсткою» схемою, визначається закон зміни ПЛРЗК під час обробки та описується залежністю

$$Q = Q_{cm} + \Delta Q_{exp} - \beta_Q \tau,$$

де  $\Delta Q_{exp} = (Q_{вих} - Q_{cm})$  – амплітуда зменшення значення ПЛРЗК при шліфуванні;  $Q$ ,  $Q_{cm}$ ,  $Q_{вих}$  – значення поточної, сталої та вихідної ПЛРЗК, мм<sup>3</sup>/хв;  $\beta_Q$  – емпіричний коефіцієнт, хв<sup>-1</sup>;  $\tau$  – час шліфування, хв.

5. Знаходиться закон зміни поточної лімітованої фактичної глибини шліфування (ПЛФГШ)  $t_{\phi}=f(Q, \tau)$  відповідно до закону зміни ПЛРЗК за формулою

$$t_{\phi}(\tau) = \frac{L + 2l_{nep}}{1000V_{cm} B \cdot L \cdot \tau_{disc}} Q(\tau),$$

де  $L$ ,  $B$  – довжина та ширина оброблюваного зразка, мм;  $l_{nep}$  – величина перебігу, мм;  $V_{cm}$  – подовжня швидкість переміщення столу зі зразком, м/хв;  $\tau_{disc}$  – час дискретизації, хв.

6. Величина подачі на врізання задається відповідно до закону зміни ПЛФГШ, а подовжня швидкість столу, на якій виконувалося шліфування за «пружною» схемою, переноситься на шліфування за «жорсткою» схемою без змін.

В результаті проведеної оптимізації знайдені режими шліфування за «жорсткою» схемою забезпечать максимальну продуктивність обробки за рахунок максимального використання різальних властивостей робочої поверхні круга та підвищення продуктивності обробки в 1, 5 – 1,6 рази.

При пошуку шляхів підвищення ефективності алмазно-абразивної обробки КНМ авторами робіт [11-13, 19-20] встановлено, що дефектність обробленої поверхні залежить від фізико-механічних характеристик, насамперед міцності і структури оброблюваних матеріалів, з якими пов'язаний рівень напружено-деформованого стану (НДС) зони різання при шліфуванні з різними вхідними параметрами технологічного процесу обробки.

Знаходження рівня НДС зони різання при абразивній обробці є складним науково-технічним завданням, що пов'язано з необхідністю визначення впливу основних характеристик процесу різання на силовий аспект процесу формування, який забезпечує конкретний напружено-деформований стан зони контакту інструмента і виробу. Результати аналізу схеми взаємодії факторів, які визначають процес абразивної обробки (рис. 3), свідчать про складність і взаємний зв'язок явищ, що протікають у зоні різання.

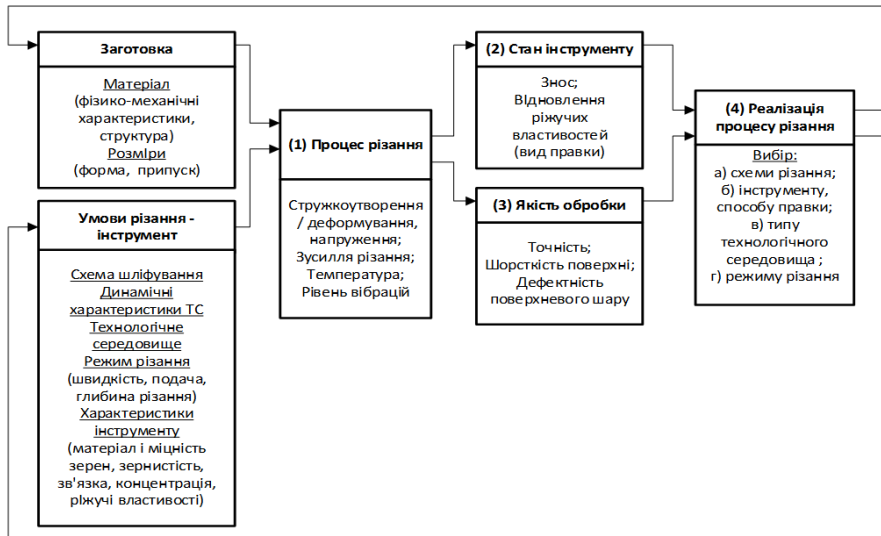


Рисунок 3 – Схема взаємодії факторів, які визначають процес абразивної обробки КНМ [20]

Нами встановлено [11-13, 19-20], що при шліфуванні названих матеріалів такі параметри дефектності як розміри, форма, щільність, глибина проникнення, в значній мірі визначаються рівнем і напрямом силового впливу на матеріал при різанні, які, в свою чергу, залежать від вхідних параметрів технологічного процесу.

Теоретично обґрунтовано [11-12, 19-22], а також в лабораторних і виробничих умовах досліджено вплив параметрів ТП на енергетичні характеристики процесу різання, які узгоджені з дефектністю сформованого поверхневого шару виробів. Для дослідження глибини та структури порушеного обробкою шару матеріалу використовувався капілярний метод люмінесцентної дефектоскопії в поєднанні з пошаровим хімічним травленням зразків до рівня, що забезпечує повну відсутність дефектів, обумовлених обробкою [12]. Цей метод дозволяє отримати неспотворену картину порушеного шару на різних рівнях залягання і виявити дефекти протяжністю від 0,1 мм до 1 мкм.

Комплексно було встановлено вплив умов процесу шліфування (див. рис. 3) на процес різання, а саме на НДС зони обробки, сили різання і, як наслідок, на якість обробки, насамперед, на дефектність сформованої поверхні [11-13, 19-20].



Вплив схеми шліфування. Виникнення дефектів в оброблюваному матеріалі в процесі шліфування пов'язано з величиною і напрямком сили різання в зоні контакту інструмента з виробом, що викликають появу певного напружено-деформованого стану в об'ємі твердого тіла. Теоретичний аналіз існуючих схем взаємодії інструменту і деталі, виконаний з використанням методів кінцевих і граничних елементів, дозволив сформулювати вимоги до спрямованості силової дії на оброблювану поверхню, що забезпечує мінімальний рівень дефектності. Для цього необхідно, щоб основний градієнт напружень від сил різання був зосереджений в об'ємі припуску, який видаляється. На підставі сформульованого принципу була розроблена і впроваджена схема обробки конкретних виробів із ситалів, що забезпечує зменшення глибини розвиненого дефектного шару на 30% при підвищенні міцності виробів на 20%.

Вплив режиму різання. Відомо, що складові сили різання при шліфуванні залежать від параметрів режиму різання. Встановлено, що незалежно від схеми обробки збільшення глибини і подачі, супроводжується зростанням зусилля різання, особливо його нормальної складової, спрямованої в оброблюваний матеріал і відповідальної за зростання дефектів, що є стримуючим фактором підвищення продуктивності обробки за рахунок інтенсифікації режиму шліфування.

Вплив характеристики ріжучого інструменту і його різальної здатності. При шліфуванні КНМ сили різання змінюються при затупленні круга, що пов'язано зі зміною площ контакту зерен з оброблюваною поверхнею, перерозподілом і рівнем номінального тиску на цих площах. Величина зносу кругів залежить від режиму шліфування, зернистості, структури і міцності алмазних зерен, а також від вихідної різальної здатності кругів, що залежить від ефективності вибраного способу їх правки. Для всіх розглянутих варіантів обробки, що відрізняються зернистістю і маркою застосовуваних алмазів, простежується тенденція до зниження дефектності при роботі правленим кругом у порівнянні з затупленим. Найбільш чітко це спостерігається при роботі кругами з меншими зернистістю і міцністю алмазів. Так застосування алмазно-абразивного інструменту з більш міцними алмазними зернами (наприклад, АС 20 у порівнянні з АС 6) при шліфуванні виробів із ситалів призводить до збільшення розмірів дефектів до 12 разів на глибині 420-500 мкм. Застосування прогресивних способів правки кругів, наприклад, правки вільним абразивом [12], дозволяє істотно підвищити стійкість інструменту і знизити рівень дефектності відразу ж після правки до 3 разів, а до кінця періоду стійкості інструменту – до 5-7 разів.

Вплив технологічного середовища. Одним з ефективних методів впливу на процеси різання КНМ є застосування мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС) зі спрямованими властивостями. Алмазне

шліфування більшості крихких неметалевих матеріалів неможливо без застосування МОТС. У цьому випадку крім виконання традиційних охолоджуючої, мастильної і миючої функцій МОТС оказують великий диспергуючий вплив на оброблюваний матеріал. Останнє, за рахунок знеміцнення поверхневих шарів матеріалу під дією МОТС, дозволяє інтенсифікувати процес різання і, як наслідок, підвищити продуктивність обробки і працездатність інструменту. Зменшення енергетичних витрат, які припадають на одиницю об'єму припуску, що видається, сприятливо позначається на глибині і структурі порушеного обробкою шару. Щоб задовольнити цим умовам, МОТС для обробки КНМ повинно бути спорідненим з фізико-хімічною структурою оброблюваного матеріалу, тобто бути полярним, містити в своєму складі поверхнево-активні добавки, що підвищують диспергуючу дію середовища і поліпшують його доставку в зону обробки, а також підвищують мастильну здатність середовища за рахунок створення екрануючих плівок між поверхнями виробу та інструменту. Ці властивості, наприклад, у повній мірі притаманні водним розчинам поверхнево-активних речовин (оксіетилованих жирних спиртів, алкілмоносультатів та ін.), які забезпечують при алмазному шліфуванні ситалів зниження енергоємності процесу до 2-х разів у порівнянні з водою, яка в основному застосовується на виробництві, і на 20% у порівнянні з середовищами на основі масляних емульсолів. Середовища, яким притаманна підвищена диспергуюча здатність, доцільно застосовувати на операціях чорнового і напівчистового шліфування технічних ситалів завдяки створенню в їх присутності сприятливої для реалізації фінішних операцій обробки структури дефектного поверхневого шару (розвиненої тріщинуватості в поверхневому шарі в поєднанні з дрібно дефектною структурою більш глибоких шарів), що дозволить істотно знизити час обробки на наступних чистових операціях.

Вплив динамічних характеристик технологічної системи шліфування. Теоретичними (експериментально-теоретична модель розвитку дефектного шару при шліфуванні ситалів з урахуванням силового і динамічного впливу елементів системи) і експериментальними дослідженнями [21, 22] встановлено, що на ефективність обробки виробів із ситалів і технічної кераміки суттєво впливає динамічна сталість технологічної системи шліфування. Був визначений інтенсивний розвиток дефектного шару при збільшенні рівня вібрацій в системі. Це дозволило встановити найбільш сприятливі поєднання параметрів режиму обробки, динамічного стану шліфувального круга за рівнем його збалансованості та інших елементів технологічної системи при обробці конкретних виробів із ситалів, при яких забезпечуються їх потрібні якість і точність обробки.

## **Висновки**

Встановлено, що при шліфуванні важкооброблюваних крихких конструкційних матеріалів різної природи структура оброблюваних матеріалів та їх фізико-механічні властивості, вимоги до забезпечення різнопланових експлуатаційних характеристик вироблюваних з них виробів визначають особливості процесу різання і пріоритети факторів, що впливають на його ефективність (продуктивність, якість і точність обробки), у кожному конкретному випадку.

Знаходження оптимальних режимів з використанням нового поняття «поточна лімітована різальна здатність круга», яка характеризує зміну різальної здатності круга під час шліфування, забезпечує підвищення продуктивності шліфування твердих сплавів в 1,5 – 1,6 рази

Прогнозування стану НДС зони різання забезпечує зменшення глибини розвиненого дефектного шару на 30% при підвищенні міцності виробів на 20% за рахунок схеми шліфування; зниження рівня дефектності відразу ж після правки круга вільним абразивом до 3 разів, а до кінця періоду стійкості круга - до 5-7 разів; зниження енергоємності процесу до 2 разів за рахунок підвищення сталості технологічної системи шліфування.

**Список використовуваних джерел:** 1. Сучасні інструментальні матеріали для оброблення різанням / В.В. Балацький, А.М. Гуржій, В.П. Голованов, В.П. Щербаков. – К.: Техніка, 1999. – 120 с. 2. Лавріненко В.І. Надтверді абразивні матеріали в механообробі: енциклопедичний довідник / В.І. Лавріненко, М.В. Новіков; ред. М.В. Новіков. – К: ІНМ ім. М.В. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с. 3. Узунян М. Д. Повышение эффективности алмазного шлифования твердых сплавов путем прогнозирования и стабилизации работоспособности кругов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Мосстанкин. – М., 1989. – 40 с. 4. Скоробогатько П.К. Режущая способность кругов при алмазно-искровом шлифовании твердых сплавов: автореф. дис...к-та техн. наук : 05.03.01 / ХПИ. – Харьков, 1982. – 25 с. 5. Матюха П.Г. Определение силы поджима образца к кругу, ограниченной температурой графитизации алмазных зерен / П.Г. Матюха, В.Б. Стрелков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вип. 71. – С. 41-46. 6. Матюха П.Г. Определение режимов плоского врезного шлифования твердых сплавов с использованием нового понятия о текущей лимитированной режущей способности круга / П.Г. Матюха, В.Б. Стрелков, В.В. Полтавец // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 3. – С. 67-73. 7. Стрелков В.Б. Підвищення продуктивності алмазного шліфування твердих сплавів за рахунок раціонального використання різальних властивостей круга: атореф. дис...к-та техн. наук : 05.03.01 / ДонНТУ. – Донецьк, 2008. – 20 с. 8. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / Ред. А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1997. – 391 с. 9. Матюха П.Г. Режущая способность рабочей поверхности круга как ограничивающий параметр производительности шлифования / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. – 2003. – Вып. 13. – С. 159-164. 10. Матюха П.Г. Шлифование труднообрабатываемых материалов кругами из алмаза и эльбора: монография / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец, А.В. Бурдин, В.В. Габитов. – Черкассы: Вертикаль, 2015. – 252 с. 11. Гусев В.В. Технологічне забезпечення якості обробки виробів із технічної кераміки: монографія / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова. – Донецьк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 250 с. ISBN 978-966-377-126-7. 12. Калафатова Л.П. Технологічні основи підвищення ефективності обробки забезпечення якості виробів із технічних стекел і ситалів: дис. .... докт. техн. наук : 05.02.08 / Калафатова Людмила Павлівна. Харків, 2001. – 515 с. 13. Калафатова Л.П. Влияние технологической наследственности на эффективность процессов механической обработки стекломатериалов /

*Л.П. Калафатова* // Справочник. Инженерный журнал. – М.: Машиностроение. – 1997. – № 9. – С. 7-11. **14.** *Ардамацкий А.Л.* Алмазная обработка оптических деталей. / *А.Л. Ардамацкий.* – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 232 с. **15.** Твердые сплавы Физико-механические свойства: ГОСТ 3882-74. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 9 с. **16.** Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т1 / Под ред. *А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мецеракова, А.Г. Суслова.* – М.: Машиностроение, 2001. – 912 с. **17.** *Мальцев М.В.* Вакуумная металлургия тугоплавких материалов и твердых сплавов / *М.В. Мальцев.* – К.: Наукова думка, 1973. – 237 с. **18.** *Грabencko А.И.* Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / *А.И. Грabencko.* – Харьков: Вища школа, 1985. – 184 с. **19.** *Калафатова Л.П.* Повышение эффективности шлифования твердых сплавов и конструкционной керамики: монография / *Л.П. Калафатова, П.Г. Матюха, Д.В. Поколенко, С.Ю. Олейник, С.А. Поезд.* – Покровск: ГВУЗ «ДонНТУ», 2017. – 182 с. **20.** *Калафатова Л.П.* Шляхи підвищення ефективності шліфування виробів із важкооброблюваних крихких неметалевих матеріалів / *Л.П. Калафатова* // Науковий вісник ДонНТУ. Всеукр. наук. вісник. – Красноармійськ: ДонНТУ, 2016. – №1 (1'). – С. 72-83. **21.** *Калафатова Л.П.* Механізми формування тріщиноватого слоя при шліфуванні ситаллов / *Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко* // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. ISSN 2078-7405. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – Вып. 86. – С. 26-34. **22.** *Олійник С.Ю.* Аналітична модель механізму утворення сумарної похибки профілю виробів типу оболонок з крихких неметалевих матеріалів під час алмазного шліфування / *С.Ю. Олійник, Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко* // Технічні науки та технології: науковий журнал. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – № 1(7). – С. 33-41.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Suchasni instrumental'ni materiali dlja obroblennja rizannjam / *V.V. Balac'kij, A.M. Gurzhij, V.P. Golovanov, V.P. Shherbakov.* – K.: Tehnika, 1999. – 120 s. **2.** *Lavrinenko V.I.* Nadtverdi abrazivni materiali v mehanooobrobci: enciklopedichnij dovidnik / *V.I. Lavrinenko, M.V. Novikov;* red. *M.V. Novikov.* – K.: INM im. M.V. Bakulja NAN Ukraїni, 2013. – 456 s. **3.** *Uzunjan M. D.* Povyshenje jeffektivnosti almaznogo shlifovanija tverdyh splavov putem prognozirovanija i stabilizacii rabotosposobnosti krugov: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.03.01 / Mosstankin. – M., 1989. – 40 s. **4.** *Skorobogat'ko P.K.* Rezhushhaja sposobnost' krugov pri almazno-iskrovom shlifovanii tverdyh splavov: avtoref. dis. ... k-ta tehn. nauk : 05.03.01 / HPI. – Har'kov, 1982. – 25 s. **5.** *Matjuha P.G.* Opredelenie sily podzhima obrazca k krugu, ograniczennoj temperaturoj grafitizacii almaznyh zeren / *P.G. Matjuha, V.B. Strelkov* // Naukovi pracj Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu. Serija: Mashinobuduvannja i mashinoznavstvo. – Donec'k: DonNTU, 2004. – Vip. 71. – S. 41-46. **6.** *Matjuha P.G.* Opredelenie rezhimov ploskogo vreznogo shlifovanija tverdyh splavov s ispol'zovaniem novogo ponjatja o tekushhej limitirovannoj rezhushhej sposobnosti kruga / *P.G. Matjuha, V.B. Strelkov, V.V. Poltavec* // Sverhtverdeje materialy. – 2004. – № 3. – S. 67-73. **7.** *Strelkov V.B.* Pidvishhennja produktivnosti almaznogo shlifuvannja tverdiyh splaviv za rahunok racional'nogo vikoristannja rizal'nih vlastivostej kruga: atoref. dis. ... k-ta tehn. nauk : 05.03.01 / DonNTU. – Donec'k, 2008. – 20 s. **8.** Abrazivnaja i almaznaja obrabotka materialov: spravochnik / Red. *A.N. Reznikov.* – M.: Mashinostroenie, 1997. – 391 s. **9.** *Matjuha P.G.* Rezhushhaja sposobnost' rabochej poverhnosti kruga kak ogranicvivajushhij parametir proizvoditel'nosti shlifovanija / *P.G. Matjuha, V.V. Poltavec* // Nadezhnost' instrumenta i optimizacija tehnologicheskijh sistem. – 2003. – Vyp. 13. – S. 159-164. **10.** *Matjuha P.G.* Shlifovanie trudnoobrabatyvaemyh materialov krugami iz almaza i jel'bora: monografija / *P.G. Matjuha, V.V. Poltavec, A.V. Burdin, V.V. Gabitov.* – Cherkassy: Vertikal', 2015. – 252 s. **11.** *Gusev V.V.* Tehnologichne zabezpechennja jakosti obrobki virobiv iz tehničnoi keramiki: monografija / *V.V. Gusev, L.P. Kalafatova.* – Donec'k: GVUZ «DonNTU», 2012. – 250 s. ISBN 978-966-377-126-7. **12.** *Kalafatova L.P.* Tehnologichni osnovi pidvishhennja effektivnosti obrobki zabezpechennja jakosti virobiv iz tehničnijh stekol i sitaliv: dis. .... dokt. tehn. nauk : 05.02.08 / *Kalafatova Ljudmila Pavlivna.* Harkiv, 2001. – 515 s. **13.** *Kalafatova L.P.* Vlijanie tehnologicheskij nasledstvennosti na jeffektivnost' processov mehanicheskij obrabotki steklomaterialov / *L.P. Kalafatova* // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. – M.: Mashinostroenie. – 1997. – № 9. – S. 7-11. **14.** *Ardamackij A.L.* Almaznaja obrabotka opticheskijh detalej. / *A.L. Ardamackij.* – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1978. – 232 s. **15.** Tverdye splavy Fiziko-mehaničeskije svojstva: GOST 3882-74. –

M. : Izd-vo standartov, 1998. – 9 s. **16.** Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja. V 2-h t. T1 / Pod red. A.M. Dal'skogo, A.G. Kosilovoj, R.K. Meshherjakova, A.G. Suslova. – M.: Mashinostroenie, 2001. – 912 s. **17.** Mal'cev M.V. Vakuumnaja metallurgija tugoplavkih materialov i tverdyh splavov / M.V. Mal'cev. – K.: Naukova dumka, 1973. – 237 s. **18.** Grabchenko A.I. Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej almaznogo shlifovanija / A.I. Grabchenko. – Har'kov: Vishha shkola, 1985. – 184 s. **19.** Kalafatova L.P. Povyshenie jeffektivnosti shlifovanija tverdyh splavov i konstrukcionnoj keramiki: monografija / L.P. Kalafatova, P.G. Matjuha, D.V. Pokolenko, S.Ju. Olejnik, S.A. Poezd. – Pokrovsk: GVUZ «DonNTU», 2017. – 182 s. **20.** Kalafatova L.P. Shljahi pidvishhennja efektnosti shlifuvannja virobiv iz vazhkoobroblyuvanih krihkih nemetalevih materialiv / L.P. Kalafatova // Naukovij visnik DonNTU. Vseukr. nauk. visnik. - Krasnoarmijs'k: DonNTU, 2016. – №1 (1'). – S. 72-83. **21.** Kalafatova L.P. Mehanizmy formirovanija treshhinovatogo sloja pri shlifovanii sitallov / L.P. Kalafatova, D.V. Pokolenko // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. ISSN 2078-7405. - Har'kov: NTU "HPI", 2016. – Vyp. 86. – S. 26-34. **22.** Olijnik S.Ju. Analitichna model' mehanizmu utvorennja sumarnoï pohibki profil' virobiv tipu obolonok z krihkih nemetalevih materialiv pid chas almaznogo shlifuvannja / S.Ju. Olijnik, L.P. Kalafatova, D.V. Pokolenko // Tehnichni nauki ta tehnologii: naukovij zhurnal. – Chernigiv: ChNTU, 2017. – No 1(7). – S. 33-41.